

# 多角度成像光谱辐射仪在大气污染研究中的应用回顾

刘阳<sup>①</sup>, 陈丹<sup>②</sup>, Ralph A. Kahn<sup>③</sup>, 贺克斌<sup>②\*</sup>

① Harvard University, School of Public Health, Boston, MA 02215, USA;

② 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084;

③ Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA

\* 联系人, E-mail: [hkb@tsinghua.edu.cn](mailto:hkb@tsinghua.edu.cn)

收稿日期: 2007-09-14; 接受日期: 2008-01-02

中国国家高技术研究发展计划(编号: 2006AA06A305)资助, 部分工作得到 Harvard-USEPA 颗粒物健康影响研究中心(编号: R-827353, R-832416)资助

**摘要** 美国宇航局于 1999 年底发射的多角度辐射成像光谱仪(MISR)采用了独特的多角度观测设计, 将 9 台相机沿卫星航迹方向按照固定角度排列并同时采集反射光. 这种设计使其具备了当前其他星载气溶胶遥感设备不具备的在陆地和海洋上空反演包括气溶胶浓度、形状以及组分的多种特性的能力. 由于对细颗粒物非常敏感, MISR 为研究区域颗粒物空气质量的时空分布特性提供了新的数据来源. 首先简要介绍 MISR 设备、它的气溶胶反演算法及数据结构, 然后综合论述了目前 MISR 气溶胶数据在空气质量研究方面的应用状况包括在污染事件(例如沙尘、火灾以及城市空气污染)中对颗粒物空间分布的观测. MISR 高质量的气溶胶数据可以作为颗粒物浓度的定量指标, 回顾了目前在估算地面颗粒物浓度方面的研究成果, 介绍了使用 MISR 高级数据对烟尘高度以及颗粒物成份的研究. 由于中分辨率成像光谱仪(MODIS)的气溶胶数据在中国有较广泛的使用, 讨论中尽可能的与之进行了比较. 最后总结了 MISR 数据在空气质量研究中的优点与不足. 相信 MISR 反演的丰富的高度量化的气溶胶数据对研究中国空气质量问题具有很大的应用价值.

## 关键词

气溶胶遥感

MISR

多角度成像

气溶胶光学厚度

颗粒物

PM<sub>2.5</sub>

PM<sub>10</sub>

大气污染

大气颗粒物是由悬浮于大气中的固-液多种粒子组成的粒径、形状和化学组成各异的复杂体系. PM<sub>10</sub>, 又称可吸入颗粒物, 是指空气动力学直径小于 10 μm 的颗粒物, 它可以引起死亡率增高和呼吸系统疾病<sup>[1,2]</sup>; 其中的细模态粒子 PM<sub>2.5</sub>, 即空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物, 能够到达人体呼吸系统深处, 因而对人体健康的潜在影响更大. 在过去的 10 a 中, 很多的流行病学研究显示, 相对于 PM<sub>10</sub> 而言, 由 PM<sub>2.5</sub> 可能引起的死亡率增高和心肺呼吸系统疾病的

相关性要更加确定和明显<sup>[3]</sup>. 更加重要的是, 似乎不存在 PM<sub>2.5</sub> 对人体健康产生影响的浓度阈值下限; 在美国大型城市典型 PM<sub>2.5</sub> 浓度条件下, 均发现了 PM<sub>2.5</sub> 对人体健康影响的相关关系<sup>[4]</sup>. 因此在 1997 年, 美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)在原有的 PM<sub>10</sub> 标准的基础上又增加了 PM<sub>2.5</sub> 的标准. 随着中国城市化进程加快和经济飞速增长, 很多大型城市现在面临着严重的大气污染问题; 很多城市的 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 浓度均明显高于美国

空气质量标准 [5,6]。然而,大型流行病学研究的慢性疾病暴露率要求在大范围内进行长期空气质量的监测,以获得相关的人群暴露数据。虽然中国大部分城市都建立了PM<sub>10</sub>地面监测网,但是对于PM<sub>2.5</sub>却只在少数的大型城市建立了研究性监测站点 [5,6]。由于地面监测PM<sub>2.5</sub>数据成本较高,而且数据来源十分有限,导致中国的颗粒物污染流行病学研究难以开展。

气溶胶卫星遥感是近年来快速发展的一项技术,可以用于弥补地面观测的不足。1999年12月,美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了第一颗地球观测卫星(Earth Observing Satellites, EOS) Terra,其主要研究课题是对地球、大气层和人类对环境的影响进行探测 [7]。这颗卫星搭载的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)和多角度成像光谱仪(Multiangle Imaging SpectroRadiometer, MISR),能够在全球范围内甚至复杂地形表面情况下,提供中等分辨率的气溶胶总量和成分的反演资料。Terra卫星上搭载的MISR和MODIS仪器均在离地 705 km 的太阳同步近极轨道上运行,自北向南通过赤道时间为当地太阳时上午 10:30 左右。除了探测全球环境和气候变化,MODIS和MISR还能够对陆地上空气质量污染进行大尺度的监测;气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Thickness, AOT)是其中最为成熟的反演产品。AOT是从地球表面到大气层顶的垂直空气柱中气溶胶的消光系数的积分。MODIS利用蓝(440 nm)、红(670 nm)和热红外(2.13 μm)光谱段的扫描资料判别暗密植被(Dense Dark Vegetation, DDV)像元,然后通过气溶胶光学及物理特性的简化假设反演陆地上气溶胶信息 [8]。MODIS公布的气溶胶产品的空间分辨率为 10 km。由于MODIS 1~2 d即可覆盖全球一次,而且具有数据直接下传能力,因而在中国大气科学和环境科学界得到了较为广泛的应用。从 2002 年以来,有很多研究应用MODIS AOT产品对颗粒物污染的时空分布和沙尘暴等现象进行了研究,本文将对部份研究成果进行简要介绍。

MISR [9]是由同时隶属于美国国家宇航局和加州理工大学(California Institute of Technology)的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)完成设计及负责运行的。相对于MODIS的单一星下点观测,

MISR采用的多角度设计能通过多种倾斜角度对大气层进行观测。作为一个研究性仪器,MISR不具备类似于MODIS的实时数据下传能力。然而,MISR功能强大的气溶胶反演算法能提供比目前其他卫星仪器更加丰富的气溶胶基本信息,可以用来研究气溶胶数量和成份的长期的时空分布变化趋势 [10]。Diner等 [11]对于MISR和MODIS的功能和数据产品做过详细的对比。迄今为止,MISR的气溶胶光学厚度产品在中国的应用还非常有限。2003年,冯晓明等 [12]对MISR AOT和地面反照率之间的关系进行了研究。2006年,韩波等 [13,14]基于数据挖掘技术利用神经网络法对AOT进行了预测。目前尚未见到MISR气溶胶产品在中国大气污染研究中的应用。本文拟重点介绍MISR的气溶胶数据产品和在空气质量监测中的应用。首先简单介绍MISR的仪器结构、气溶胶反演和校验、以及数据产品的结构。然后,回顾MISR气溶胶数据在空气质量监测方面的应用成果。在讨论与MODIS相似的参数时,和MODIS气溶胶数据产品的研究结果进行了对比。对于MISR独有的气溶胶参数,主要介绍如何应用MISR的立体观测数据产品研究烟尘高度,以及如何将MISR提供的气溶胶组分信息与颗粒物成份进行关联。最后,对MISR数据产品在中国空气质量研究中的潜在应用价值和限制因素进行了总结。

## 1 MISR 设备,气溶胶反演,数据结构和验证

### 1.1 MISR 设备

图 1 为MISR系统剖面图,仪器的中心为光具座,9台相机(图中的黄色圆筒状物体)的一端固定在光具座上,另一端悬挂于仪器箱体内。其中1台相机指向星下点,对应于地球表面的标定观测角度为0°;另外8台相机按照固定的角度排成对称的两排,对应于地球表面的标定观测角度分别为26.1°,45.6°,60.0°和70.5°。箱体内左侧为相机电子设备,右侧为系统电子设备。详细的MISR仪器信息请见1998年Diner等 [9]的文章。每个相机在4个波段(中心波长分别为446,558,672和866 nm)测量地球的反射光强度;因此,MISR共使用了36个平行的信号通道来收集地表以及大气层的信息。从9台不同角度的相机得到的穿透大气层的有效路径比最高可达到3(以星下点方向为

参照, 星下点方向为1, 70.5°方向为3), 在中纬度地区可观测到的颗粒物散射角度可达到60°~160°; 这些都为反演气溶胶光学厚度之外的其他颗粒物微物理学参数, 如粒径分布和颗粒物形状等信息提供了基础。MISR星下点相机的相邻像元中心点横向间距(相对于卫星轨道而言)为250 m, 其他相机为275 m。所有相机的相邻像元中心点纵向间距均为275 m。经过辐射标定和地理修正后, 所有信号通道的数据都平均到1.1 km的分辨率用于气溶胶反演, 生成的气溶胶二级数据的分辨率为17.6 km。不同于MODIS, MISR并不会在垂直于卫星飞行轨道方向上进行往复式扫描。MISR采用的推帚式设计使9台相机在同一时间沿卫星飞行轨道方向扫描, 扫描刈幅为376(星下点方向)和413 km(非星下点方向)。由于邻近轨道的扫描幅宽有部份重叠, 在赤道地区的重访周期为9 d, 在极点地区为2 d。

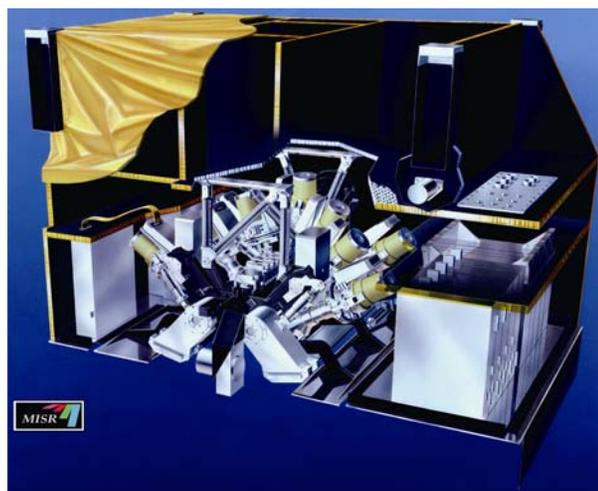


图1 MISR设备剖面示意图

图中9个黄色圆筒状物体为相机; 在这个方位上, MISR将向下对地球进行探测

## 1.2 MISR气溶胶反演算法

MISR气溶胶产品在陆地上的反演算法比较复杂, 详见1998年Martonchik等<sup>[10]</sup>的文章以及MISR气溶胶反演理论基础文件(ATBD-MISR-09, [http://eosps.gsf.nasa.gov/eos\\_homepage/for\\_scientists/atbd](http://eosps.gsf.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd)), 在此仅做简单介绍。在MISR业务气溶胶数据产品中, 假设地球表面每个17.6 km×17.6 km的区域内大气气溶胶在水平方向上成分均一。为了有效区分地球表面

本身和大气层中的反射和散射光线, MISR并未采用MODIS的暗密植被(DDV)像元法所假设的特定表面类型。MISR没有直接使用观测到的辐射率, 而是利用这个反演区域内地表的空差异计算出系列经验正交函数(Empirical Orthogonal Functions, EOF), 用来描述该区域内的反射随观测角度的变化。这些经验正交函数被用来拆分大气散射和地表散射。为了有效的计算辐射传输, MISR预设了一系列气溶胶模型(在MISR算法中称为气溶胶混合物, Aerosol Mixtures), 以代表全球的气溶胶类型。预设的气溶胶混合物假设可以提高反演计算效率, 并通过与观测结果的比对确定该气溶胶模型是否符合实际。这些气溶胶模型由一系列不同粒径分布、颗粒形状、折射和散射参数以及特征高度的气溶胶组成, 每一组气溶胶混合物最多可以包括3种不同的气溶胶组分。比如, 在MISR最新的气溶胶产品中(第20版)共有8组74种气溶胶混合物。以其中“Spherical\_Reff\_0.12\_Reff\_2.80\_Med\_Dust”为例, 这一组气溶胶混合物包括以下3种组分: (1) “spherical\_nonabsorbing\_0.12”(对数粒径分布、球状、有效粒径为0.12 μm的不吸光性气溶胶); (2) “spherical\_nonabsorbing\_2.80”(对数粒径分布、球状、有效粒径为2.80 μm的不吸光性气溶胶); (3) “grains\_model\_h1”(对数粒径分布、非球状、有效粒径为0.75 μm的沙尘颗粒)。每一种气溶胶成分在混合物中的比例为0~100%之间, 成分总和为100%。这一组气溶胶混合物由于内部3种组分所占比重不同分为12种不同的气溶胶混合物。因此, 为数不多的气溶胶类型就能够组成上万组可能的气溶胶混合物。然而通过多个全球气溶胶传输模型研究发现, 所有混合物的可能性中的很小一部分就能够基本代表当今全球的气溶胶类型, 所以在MISR的反演算法中只选择了这些混合物类型<sup>[15]</sup>。

预设气溶胶混合物的方法显著提高了反演的计算速度, 同时可以决定各种混合物设定是否与观测值吻合。MISR将基于这些气溶胶混合物假设得到的大气层顶(Top-of-Atmosphere, TOA)辐射强度计算值与直接观测的大气层顶辐射强度进行比对, 然后利用卡方(Chi-Square)统计检验法以确定这些气溶胶混合物与实际观测的匹配程度。这个检验法还考虑到了仪器观测本身的误差对反演结果的影响。在一系

列关于MISR理论的文章中, Kahn等<sup>[15,16]</sup>描述和评估了MISR对不同光学特征和粒径分布的气溶胶类型的区分能力;结果显示在正常观测条件下, MISR能对陆地上的3类气溶胶粒径分布, 两类不同的单次散射反照率(Single-Scattering Albedo), 以及两类颗粒形状(球形与非球形)进行区分. 也就是说, MISR可以区分大约12种不同的气溶胶. 此外, Kalashnikova等<sup>[17,18]</sup>从理论上加强了沙尘颗粒光学模型的定义, 从而对球体和非球体的颗粒物区分更加有效, 提高了MISR反演结果的可靠性. 这些研究和评估结果为MISR反演中气溶胶混合物组的选择和更新提供了科学基础.

### 1.3 MISR 气溶胶数据结构

本文主要围绕 MISR 可直接应用于空气质量研究的二级气溶胶数据产品(MIL2ASAE)进行介绍. MISR 数据产品由美国国家宇航局的兰利研究中心(Langley Research Center, LARC)大气科学数据中心(Atmospheric Sciences Data Center)进行发布和管理, 相应的数据处理状态、产品历史、版本信息和客户服务工具等详见 <http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/data.html>. MISR 二级业务气溶胶数据产品包括飞行和几何参数、气溶胶光学厚度参数、气溶胶混合物信息和各种质量保证(Quality Assessment)参数等. 这些数据产品格式为 HDF-EOS Grid (一种对标准 Hierarchical Data Format (HDF)格式的延伸). 由于不同轨道上的 MISR 像元有固定的地理坐标, 这些信息单独存于 MISR 附属地理数据产品文件中(Ancillary Geographic Product (AGP)). MISR HDF-EOS Grid 数据格式和参数定义详见 <http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/documentation.html>. 为方便熟悉 MODIS 数据结构 (HDF Swath)的用户使用, 目前在 LARC 的 MISR 数据下载主页上可以将 MISR 原始 HDF-EOS Grid 文件结合 AGP 文件, 转化得到与 MODIS 类似结构的数据产品. 这个主页还可以选取用户需要的参数, 地理位置和时间段输出数据. 关于气溶胶类型(如粒径分布、折射和反射参数、有效粒径等)和混合物(如每种气溶胶类型的百分比)信息分别存于 MISR 气溶胶物理和光学性质(Aerosol Physical and Optical Properties (APOP)) 文件和气溶

胶混合物(Aerosol Mixture)文件中, 亦可通过兰利研究中心的网页进行查询. 需要说明的是, 由于 MISR 仪器本身和其反演算法相对较新, 随着气溶胶研究和 MISR 反演算法的校验及发展, MISR 反演计算、APOP 和 Aerosol Mixture 文件也在不断的进行周期性的更新; 每进行一次更新, 部份 MISR 历史数据将会进行一次重新处理, 并发布相应更新版本的数据产品. 在这些数据产品中, 某一些类型的数据如 AOT 等由于相对校验较容易, 因而产品较为成熟; 而另外一些如气溶胶微物理学参数等由于校验相对困难, 因而数据产品还在进一步完善中. 详见数据产品信息 <http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/Version/pge9.html>.

### 1.4 气溶胶光学厚度的验证

自从1999年MISR升空运行以来, 其AOT数据就与太阳光度计地面观测网AERONET (Aerosol Robotic NET-work)在全球很多地区的气溶胶光学厚度(AOT)地面观测值进行了广泛的校验<sup>[19,20]</sup>. 此外, MISR参加了一系列有卫星, 航空以及地面/海面采样设备参加的大型监测试验<sup>[21,22]</sup>. Liu等<sup>[23]</sup>对比了AERONET在美国陆地上的观测数据和MISR AOT早期版本的数据, 显示MISR AOT的整体反演误差为 $\pm 0.04 \pm 0.18 \times \text{AOT}$ ; 当剔除加州3个观测站点以后, 二者的简单线性相关系数 $R^2$ 达到了0.90. Kahn等<sup>[24]</sup>发现在全球范围内, AERONET观测数据和MISR AOT反演数据的相关性在海上站点最高(~0.9), 在沙地站点最低(>0.7). 相应的, MODIS AOT早期版本的数据和AERONET观测数据的线性相关性 $R^2$ 大约为0.70<sup>[8]</sup>. MISR和MODIS早期版本的AOT数据比较显示, MODIS AOT数据在陆地上明显高于MISR(平均高35%), MISR AOT数据在海上则稍高于MODIS(介于0.01~0.03之间)<sup>[25]</sup>. 在印度进行的不同季节的校验研究<sup>[26]</sup>显示, MISR在冬季和夏季的表现均好于MODIS; 尽管其重访周期长于MODIS, 但是其多角度探测的优势仍然弥补了这个不足.

此外, 在沙漠和人口聚集的城市中心地区, 由于地面反照率过高, MODIS的业务算法因为地面缺少密集植被而无法进行反演. 这一结论也通过在北京进行的太阳光度计地面观测比较得到了部分印证<sup>[27]</sup>.

Martonchik等<sup>[28]</sup>分析了MISR AOT在沙漠地区的数据,发现MISR能够定量捕捉到沙漠中的强烈沙尘活动的时间变化特征. Christopher和Wang<sup>[29]</sup>把在敦煌采集的MISR AOT值与地面太阳光度计测量的AOT值进行了比较,得到的相关系数在0.85到0.95之间. Jiang等<sup>[30]</sup>对AERONET在北京站点的观测数据和MISR AOT数据进行了不同时段平均和多种回归分析,3 a的比对结果显示二者的相关性系数 $R^2$ 高达0.96;他们发现在城市地区,由于各种复杂局地排放源将导致城市尺度的气溶胶空间分布不均一,因而必须缩短AERONET地面观测数据与MISR对应的时段平均窗口,例如从以前的校验研究中所取的2 h缩短为30 min. 综上所述,对于中国的西北部沙漠地区和沿海的大型城市群, MISR将是一种更加适用的新型卫星遥感工具. 值得一提的是,随着MISR数据质量逐渐被科学界认可, MISR已经和AERONET观测值一起被用于评价区域以及全球气候模型的模拟结果<sup>[31,32]</sup>.

## 2 MISR 气溶胶产品在空气质量监测中的应用

### 2.1 气溶胶的区域分布

中国有较多的研究利用MODIS AOT数据对气溶胶时空分布特征进行分析. 李成才等<sup>[33]</sup>利用MODIS数据对四川盆地气溶胶光学厚度的空间和季节变化进行了研究并对AOT高值区域进行了确认. 刘桂青等<sup>[34]</sup>对长江三角洲地区的4个城市MODIS AOT月均数据进行了研究,发现春季的月均高值可能来源于中国北部地区的沙尘传输. 李成才等<sup>[27]</sup>还利用MODIS AOT数据对中国东部地区进行了研究,发现大多数AOT高值区域均位于海拔较低、工业化和人口密集的地区;季节平均MODIS Angstrom指数显示该地区的气溶胶主要来自于人为源. 李成才等<sup>[35]</sup>还在MODIS AOT业务反演算法基础上改进计算了1 km分辨率的AOT数据,对珠江三角洲地区的气溶胶重污染时段下的气溶胶空间分布进行了定量研究.

有较多的利用MISR气溶胶数据产品进行类似的空气质量状况的研究. Martonchik<sup>[36]</sup>和Kahn等<sup>[37]</sup>在各自的文章中给出了多个利用MISR真彩色图像和AOT对沙尘暴、森林大火、雾霾和火山喷发过程进行研究的例子. 由于该地区的地表反照率过高导致MODIS

反演算法失效, Frank等<sup>[38]</sup>利用MISR AOT数据对美国南加州莫哈维沙漠地区的气溶胶空间和季节分布进行了研究. 他们发现当地的MISR AOT的结果与区域平均AOT结果有显著差异,显示了局地排放源的影响. Prasad等<sup>[39]</sup>研究发现印度冬季主要城市和燃煤电厂上空的MISR AOT值明显高于周边地区. 他们的研究还发现燃煤电厂上空的气溶胶单次散射反照率高于大城市,这可能是由城区机动车排放的碳黑引起的. 在本文中我们给出一些其他的例子. 图2显示了2001年10月15日在位于印度东北部的恒河平原观测到的大气状况,该地区气溶胶层明显较厚,与高海拔的青藏高原地区的清洁大气形成了明显的对比. 可以看出由于70°相机的倾斜角度增大,有效路径增长,因而拍到的气溶胶层要清晰得多. 图2(c)是该地区的反演AOT值. 在喜马拉雅以南的印度-恒河谷地, AOT值大约为0.5~1.0,而重污染地区的AOT值达到了2.0以上. 研究表明印度及其周边地区的气溶胶污染,主要来源于工业、机动车和生物质开放燃烧. Di Girolamo等<sup>[40]</sup>利用MISR四年的数据对印度及其周边地区冬季的AOT分布特征进行了研究,发现了在以前的空气质量模型中都未模拟出印度恒河谷地的AOT高值中心,这一差异有可能是由于这一地区的排放清单低估导致的.

由于来自于戈壁沙漠的沙尘通常能够抬升到3 km左右的高度,从而能向东南方向进行传输<sup>[41]</sup>. 由于这些沙尘能同时卷挟农业源和工业源气溶胶并传输较长距离,因而会在传输途中造成严重的能见度下降和空气质量恶化的问题. 图3为MISR拍摄的一组间隔为16 d的图像,包括中国辽宁省和北朝鲜地区,观测范围为280 km×342 km. 图3(a)是2002年3月23日相对清洁的情况,对比明显的是图3(b)所示4月8日沙尘污染严重的情况. 从图3(b)可以看到,几乎所有地区都笼罩在沙尘天气下,只有左下角的位于渤海湾的辽东半岛尚依稀可见. 受沙尘影响的一大部份地区AOT数值缺失. 从可见的AOT空间分布上可以看出从东北向西南方向的总体AOT递减梯度. 辽宁内陆和朝鲜部份地区的AOT值在0.6~1.2之间,而辽东半岛和渤海湾上空的AOT值在0.3~0.6之间.

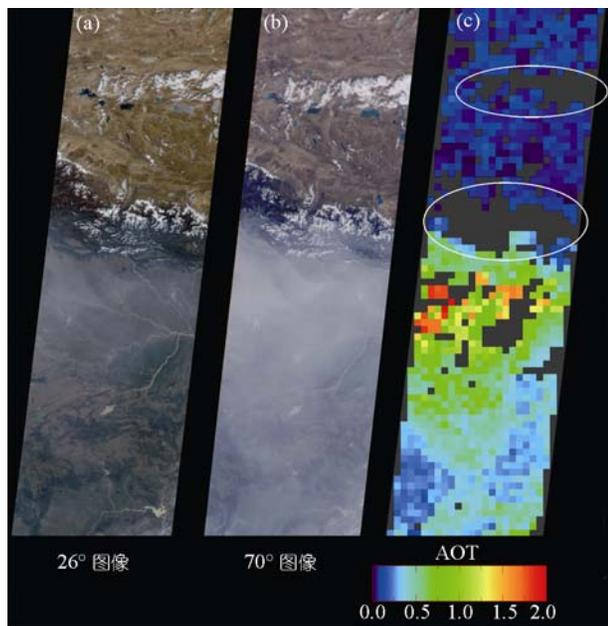


图 2 2001 年 10 月 15 日印度东南部低海拔平原上大气颗粒物污染 MISR 图像

与图像上部高海拔青藏高原地区的清洁大气形成鲜明对比。(a)和(b)分别为 MISR 26°和 70°前视相机拍到的图像。(c) 为 558 nm 处的 AOT 值, 图中 AOT 值为深灰色的地区是无法进行反演计算的地区, 如地形复杂的尼泊尔喜马拉雅地区(下部白色圆圈所示)和云量较多的区域(上部白色圆圈所示)

AOT 反演数据的缺失可能是由于高浓度的沙尘呈现出云的光学特性, 造成 MISR 气溶胶反演程序中的不同角度相机间的相关性检验测试 (Image An-

gle-to-Angle Correlation Test) 在很多 17.6 km 的区域内没有通过, 从而使 AOT 计算无法进行 [36]。

### 2.2 气溶胶光学厚度与大气污染直接参数的对比

气溶胶光学厚度 AOT 是从地球表面到大气层顶的垂直柱中的消光系数的积分, 无法作为直接的大气污染参数。因此有较多的研究尝试将 AOT 与直接的大气污染参数进行关联。夏丽华等 [42] 建立了 MODIS AOT 与广州大气污染指数 API 的相关关系以建立大气污染早期预警系统。王皓和查勇 [43] 依据大气污染指数 (API) 的分级标准, 将南京市 API 用特定的步长分组, 再把各组的 MODIS AOT 和 API 均值建立相关模型, 利用该模型来预测空气质量指数, 证实 MODIS AOT 可以作为城市颗粒物污染的初步表征参数。韩晶晶等 [44] 对全国 MODIS AOT 月平均值和出现的沙尘天气进行了关联, 发现在沙尘源区二者有着明显的相关关系。李成才等 [45] 利用 MODIS AOT 和北京地面观测数据计算了季节性气溶胶特征高度, 并以此对北京和周边地区的能见度空间分布特征进行了研究。孙娟等 [46] 在上海地区进行了类似的研究发现, 能见度最低的情况发生在冬季, 而且重工业地区通常能见度较低。由于 AOT 与颗粒物质量浓度直接相关, 因此建立 AOT 与地面颗粒物浓度的相关关系可以为颗粒物污染监测提供有效的手段 [47]。针对 PM<sub>10</sub> 已经列入中国大气质量标准, 已经有一些研究

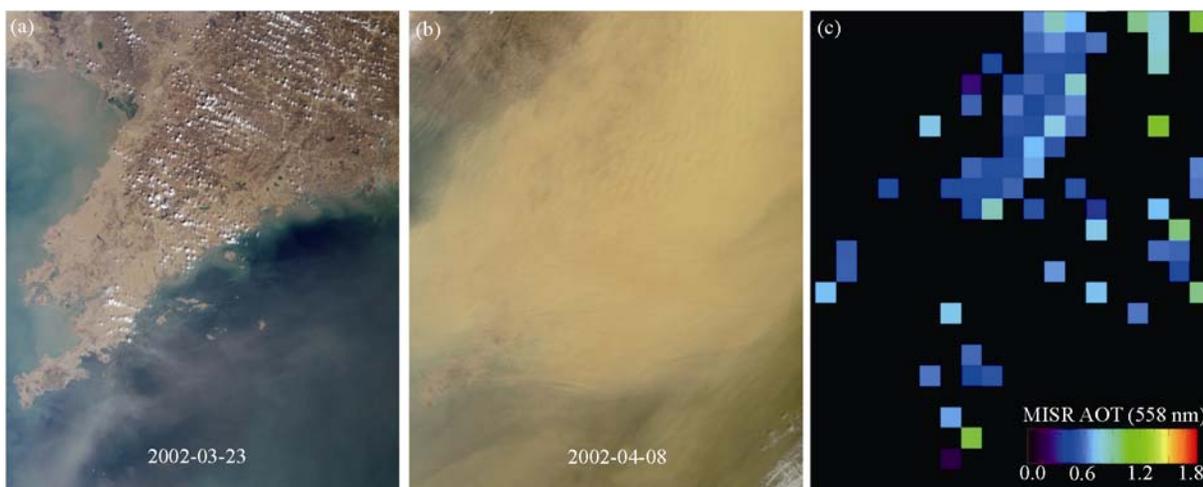


图 3

(a) 2002 年 3 月 23 日的清洁大气; (b) 2002 年 4 月 8 日 MISR 拍到的中国辽宁省重沙尘污染图像; (c) 2002 年 4 月 8 日 MISR AOT 反演数值

尝试建立AOT与地面PM<sub>10</sub>浓度的相关关系. 李成才等<sup>[48]</sup>利用自行开发的1 km分辨率的MODIS AOT数据产品对香港的重污染过程进行了研究. 他们发现对于植被稀少的复杂城市地区, MODIS标准的10 km分辨率数据产品与地面PM<sub>10</sub>浓度相关关系较差, 1 km分辨率的业务算法数据产品则有所提高.

(i) 多元线性回归分析. 如前所述, PM<sub>2.5</sub>比PM<sub>10</sub>的健康影响更加明显. MISR的仪器设计使其对于0.05~2.0 μm粒径范围的颗粒物敏感度高, 这与PM<sub>2.5</sub>的粒径范围非常符合. Liu等<sup>[49]</sup>对2001年美国东部的MISR AOT数据和PM<sub>2.5</sub>日均浓度数据进行了回归分析, 并在此基础上建立了一个统计分析模型. 该模型不仅包括MISR AOT数据, 还包括了气象参数、季节和地理参数等, 用于定量描述气溶胶垂直分布、相对湿度增加引起的颗粒物生长、颗粒物成分等对AOT和PM<sub>2.5</sub>浓度之间的相关关系的影响. 当剔除PM<sub>2.5</sub>浓度大于40 μg/m<sup>3</sup>的点之后, 模型相关指数 $R^2$ 达到了0.46左右. 因为在更高的PM<sub>2.5</sub>浓度条件下的数据样本量不足, 该模型现有的参数不足以代表高PM<sub>2.5</sub>浓度和各独立变量之间的关系. 由于在中国主要城市的PM<sub>2.5</sub>浓度均相对较高, 该经验模型在中国可以经过延伸后应用.

在气溶胶数据产品方面, MISR和MODIS由于仪器功能不同因而形成了数据互补的优势. 为了比较MISR和MODIS AOT对地面PM<sub>2.5</sub>浓度的预测能力, Liu等<sup>[50]</sup>用MISR和MODIS AOT作为主要参数, 在美国密苏里州圣路易斯地区建立了两个结构相似的回归模型. 模型结果显示, MISR和MODIS AOT都可以有效的预测地面PM<sub>2.5</sub>的日平均浓度. 尽管早期版本的MODIS AOT的绝对值存在正偏差<sup>[8]</sup>, 但是这两个回归模型的结果显示MISR和MODIS AOT对地面PM<sub>2.5</sub>浓度的预测能力相当. 这两个模型的主要回归系数非常接近, 这说明在一定情况下, 可以将MISR AOT时空覆盖范围大和MODIS AOT数据质量高的优势进行互补应用. 目前对融合MISR和MODIS数据的研究正在进行. 例如Vermote等<sup>[51]</sup>延伸了已有的混合清洁日和污染日的概念来反演气溶胶吸光特性. 他们首先用MODIS反演AOT, 然后MISR数据被使用了两次, 第一次用于确定地表特性, 第二次是以地表特性为边界条件反演单次散射反照

率. 计算结果与AERONET的独立估计值相比偏差小于0.02.

(ii) 比例计算方法. 不同于回归分析方法, 比例计算方法采用模型模拟的结果对气溶胶垂直分布、颗粒物成分等因素对AOT和PM<sub>2.5</sub>之间的相关关系进行描述. Liu等<sup>[52]</sup>利用全球化学和传输模型GEOS-Chem<sup>[53,54]</sup>提供的气溶胶中硫酸盐、硝酸盐、铵盐、元素碳和有机碳各种组分的垂直分布和Georgia Tech/Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport (GOCART)<sup>[55]</sup>提供的月均沙尘和海盐浓度建立了MISR AOT和地面PM<sub>2.5</sub>浓度的关系. 比例计算方法为卫星遥感AOT和地面PM<sub>2.5</sub>浓度的时空变化关系提供了更好的物理基础. 该方法与2001年全美近1200个监测站点的24 h重量法采样的PM<sub>2.5</sub>浓度进行了比对, 回归分析显示MISR PM<sub>2.5</sub>预测年均浓度与EPA PM<sub>2.5</sub>测试浓度误差较小, 相关系数 $r$ 为0.81. Van Donkelaar等<sup>[56]</sup>采用该方法并拓展了模拟时间和区域, 对2001~2002年美国 and 加拿大空气质量监测网络所覆盖的地区进行了研究. 测试结果显示, 依据MISR与MODIS AOT计算得到的PM<sub>2.5</sub>年均浓度与地面监测值相关性良好; 剔除加州数据以后, 二者的线性回归相关性系数 $r$ 和斜率分别为: MODIS AOT( $r=0.69$ , 斜率=0.86), MISR AOT( $r=0.69$ , 斜率=0.70). 依据MODIS AOT计算得到的PM<sub>2.5</sub>浓度与地面监测值相关性略高于MISR.

回归分析(例如Liu等<sup>[49]</sup>的研究)和比例计算方法(例如Liu<sup>[52]</sup>和van Donkelaar等<sup>[56]</sup>的研究)在时间、空间分辨率和算法上各有特点. 利用多元回归方法, 可依据卫星AOT计算每日的PM<sub>2.5</sub>浓度, 而空间分辨率则仅仅受限于卫星反演数据和气象学参数(一般为10~40 km). 然而, 多元回归方法所基于的统计学分析理论需要假设气溶胶垂直分布平滑而且成分相对稳定. 长距离传输造成的高空孤立的污染层可能导致该基本假设不成立, 从而影响多元回归计算结果的正确性. 在比例计算方法中, 由于气溶胶模拟采用的全球化学传输模型考虑了长距离传输的影响, 因而能更好的处理气溶胶垂直分布的不连续性, 从而能够在对不同地理特征的跨区域模拟中得到更为合理的结果. 比例计算方法的缺点在于, 其空间分辨率受限于气溶胶模拟所采用的模型精度. 虽然全球化

学传输模型能够提供较为准确的年平均气溶胶空间分布,但是受限于模型计算能力,其空间分辨率只能达到  $2^\circ$ 左右(中纬度地区 $\sim 150$  km).为了提高空间分辨率,不仅仅需要对三维化学传输模型在更小尺度( $\sim 20$  km)上的模拟能力本身进行更深入的校核,同时也需要对气溶胶垂直分布模拟结果的可靠性进行校核.总之,回归分析和比例计算方法均需要进行不断完善.

### 2.3 烟尘高度反演

与其他的卫星遥感设备相比, MISR 独具的立体匹配技术,能够对区别于背景环境具有明显对比特征的烟尘进行识别,并对烟尘顶部高度进行自动计算.其业务算法的原理<sup>[57]</sup>主要是利用垂直和近垂直观测角度的照相机,通过快速匹配法则确定 MISR 影像中烟尘顶端在水平面上的像位,利用几何运算将烟尘顶端成像的水平相差转化为烟尘高度.这些立体数据在垂直方向的分辨率达到 500 m 左右.这项技术可用于研究火灾、沙尘暴或火山喷发等的气溶胶源区特征.但是如果烟尘本身太过稀薄导致与背景环境对比不强烈,则在现有垂直摄像角度下,快速匹配系统将无法进行辨识.在这种情况下, MISR 的科研算法可以通过增大摄像角度来提高烟尘与背景的对比度,从而提高垂直分辨率.在  $60^\circ$ 和  $70^\circ$ 摄像角度下,垂直分辨率可达到 250 m 左右.当 MISR 立体匹配法则未探测到地面异常影像时,将直接报告地形海拔高度.对这项技术的理论背景和应用实例的综合阐述可见 Kahn 等<sup>[37]</sup>的文章.

Stenchikov 等<sup>[58]</sup>为了评估 2001 年“9.11”事件对人口和环境的影响,结合地面/卫星观测数据和数值气象预测的方法,对当时世贸大厦坍塌所产生的烟尘扩散过程进行了模拟.他们首先利用多尺度区域空气质量模型(Regional Atmospheric Modeling System, RAMS)计算了大气动态过程,网格精度从 300 km 到 250 m;然后利用 HYPACT (Hybrid Particle And Concentration Transport)模型对污染物传输过程进行了模拟.模拟结果与世贸大厦附近楼顶的  $PM_{2.5}$  测量数据、Landsat 卫星图像和 MISR 烟尘高度反演结果等进行评估.图 4(a)是 2001 年 9 月 12 日 MISR  $70^\circ$ 前向像机所记录到的真彩色图像,四个方框内是距离世

贸大厦下风向 70 km 内的一系列区域;图 4(b)是 MISR 业务算法得到的烟尘高度,水平分辨率为 1.1 km,烟尘高度的精度为 500 m.需要注意的是,在 Stenchikov 等<sup>[58]</sup>论文中使用了科研算法的结果,采用  $60^\circ$ 和  $70^\circ$ 前向相机记录的影像计算得到的烟尘垂直分辨率达到了 250 m,显示了增大摄像角度对稀薄烟尘高度数据的敏感性.根据 2001 年 9 月 12 日新泽西州纽华克机场地面拍摄的照片显示,当天烟尘高度为 1000~1500 m.而 MISR 计算结果显示在世贸大厦附近,烟尘高度为 1250 m 左右,在向下风向传输的过程中,整体稍有扩散抬升;MISR 计算结果与实际观测吻合.

图 5 为 MISR 拍到的 2004 年 3 月 10 日席卷中国东北部的一次大规模的沙尘暴传输过程.这些图像提供了沙尘高度和可能的沙尘源区信息;覆盖范围为  $380$  km $\times$  $685$  km.从真彩色图像中可以看到,浅褐色的烟尘波纹从内蒙古向东南方向延伸,直到北京、辽宁和吉林等地.从地形高度图上可以看到辽宁和吉林省东部地区本应该为相对较低的平原;因此综合可以判断这次沙尘的影响范围大概为图中辽宁和吉林省所在的白色多边形区域.这些地区的沙尘非常明显,沙尘距离地面高度达到了 1.5 km 以上.

MISR 对于气溶胶烟尘高度的反演在空气质量研究中具有重要的应用价值. Stenchikov 等<sup>[58]</sup>研究表明在灾难情况下地面观测无法正常进行的时候, MISR 对于地面小尺度的反演非常有效.此外,化学传输模型在预测森林大火带来的烟尘排放对于空气质量和气候的影响时,其中不确定性最大的就是烟尘喷射高度.因此对于烟尘高度的研究,可以对沙尘传输、沉降以及与工业源和农业源排放的混合等等研究起到重要的意义. Mazzoni 等<sup>[59]</sup>首次将 MISR 反演气溶胶高度整合进入模型模拟中,基于数据挖掘技术对 MISR 烟尘高度进行分类,并将烟尘喷射高度和喷射方向与 MODIS 的火情观测相关联.随着大规模卫星数据处理能力的提高,将有可能将这些信息作为输入数据整合进入全球模型中.

### 2.4 $PM_{2.5}$ 成分分析

如前所述, MISR 在反演气溶胶的过程中预设了一系列气溶胶混合物的假设.这些气溶胶混合物在

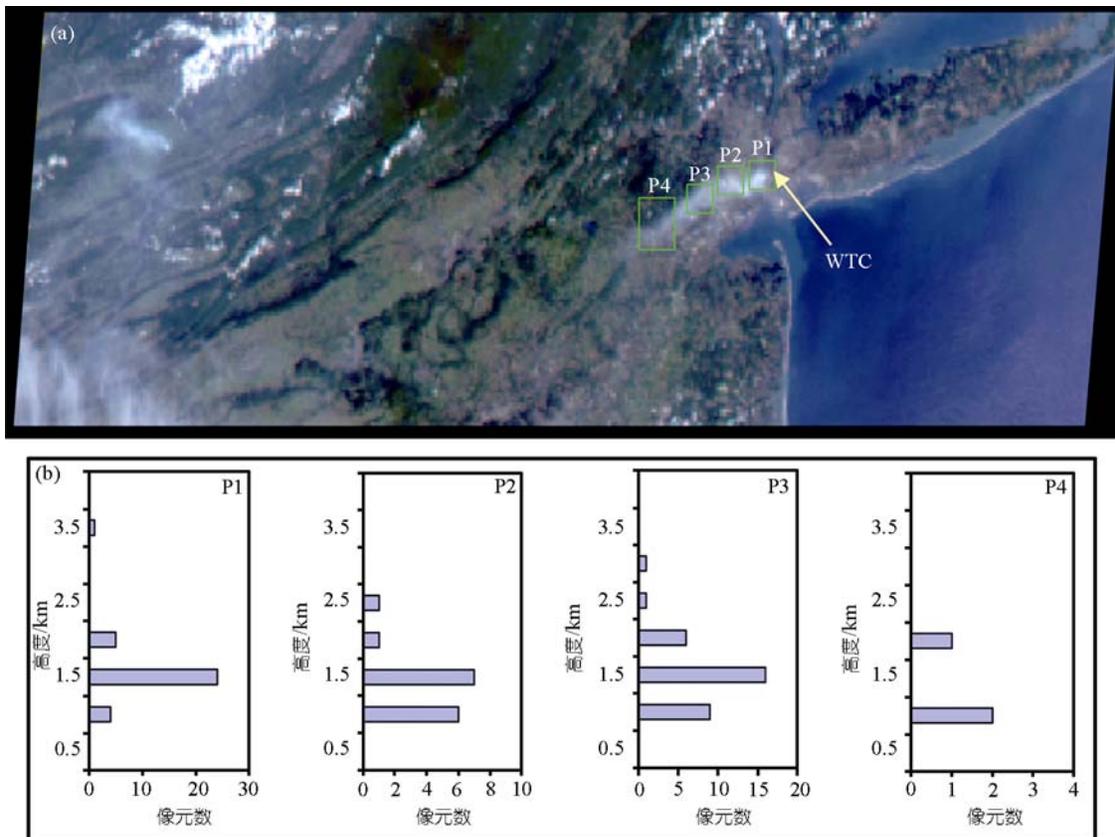


图4 2001年9月11日世贸中心坍塌引起的烟尘传输 MISR 图像(a)以及反演得到的烟尘高度分布图(b)

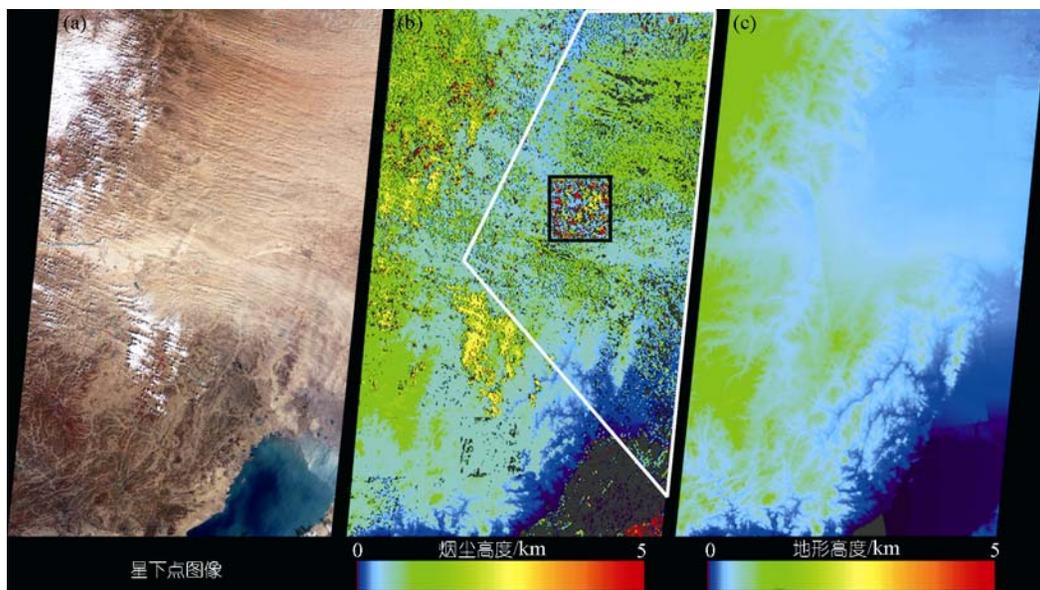


图5 2004年3月10日沙尘传输席卷中国东北部的 MISR 图像

3幅图像分别为 MISR 星下点相机拍到的真彩色图像(a)、反演得到的烟尘高度图像(b)和地形高度图(c); 这些图像提供了沙尘高度和可能的沙尘源区信息. 沙尘影响的大略区域在图(b)中用白色多边形标出, 其中黑色小正方形所示的区域为数据处理系统误差. 沙尘高度无法进行反演的地区用暗灰色表示

概念上与其他卫星包括MODIS的气溶胶反演算法中的气溶胶模型概念很类似. 但是由于MISR能从 9 个角度对地面进行观测, 因而MISR能够定义的气溶胶混合物的类型更多. 例如, 第 20 版的MISR气溶胶产品包括了 74 种不同的气溶胶混合物, 而目前第 5 版MODIS AOT数据(collection 5)在陆地上只使用了 5 种气溶胶模型. MISR的反演算法计算出相对于所有定义的气溶胶混合物的大气层顶的辐射率, 并逐一与观测值进行比对, 以确定与实际观测最为匹配的气溶胶混合物类型. 所有被算法认为可以与观测值合理匹配的气溶胶混合物所对应的AOT值都记录在MISR的数据产品中. MISR 气溶胶数据产品中的最佳AOT估计值(Best-Estimate AOT)实际是根据所有匹配的气溶胶混合物计算得到的平均值. 值得一提的是, 在MISR研究型算法中, 为了更准确的描述在某些特定区域的气溶胶特性并提高空间分辨率, 每组气溶胶混合物可由 4 种气溶胶类型组成, 提供更丰富的气溶胶组分信息 [15].

Liu等 [60]利用MISR数据中的气溶胶成分和混合物信息, 提出了由 4 个步骤组成的颗粒物组分AOT法对地面 $PM_{2.5}$ 浓度和主要成分进行估计. 首先, 使用所有MISR数据中包含的所有匹配的气溶胶混合物信息, 根据其中包含的气溶胶组分对MISR AOT的贡献比例计算得到每种组分相应的柱AOT值. 然后根据全球化学传输模型模拟得到的气溶胶垂直分布和柱AOT值, 按比例计算得到每一种气溶胶组分的近地面AOT值. 然后把这个近地面AOT值作为预测 $PM_{2.5}$ 成分的主要参数以建立回归模型, 其中还可以加入相对湿度修正因子、季节和地理变量等. 最后从回归模型的相关性系数计算得到粒径分布信息. Liu等 [61]根据 2005 年MISR数据和美国EPA的Speciation and Trend Network(STN)提供的 $PM_{2.5}$ 的成分信息, 利用这个方法建立了多元线性回归模型进行了计算. 在与地面EPA监测进行比对时发现, 在美国全国预测的 $PM_{2.5}$ 质量浓度和硫酸盐浓度以及美国西部的硝酸盐浓度结果与实际观测吻合. 特别是在美国西部地区, 相对于仅仅将平均AOT值作为单个参数(即将AOT分解成各组分的AOT值)的模型比较起来, 预测结果有了显著的改善. 实际上这种方法还可以通过引入更加先进的非线性模型来加以完善.

### 3 讨论和结论

本文对 MISR 仪器、气溶胶反演和数据结构进行了介绍. MISR 的多角度推帚式设计使得它能够得到比其他卫星更多的高质量气溶胶信息. 在各种地形条件下与地面真值的校验研究证明 MISR 是迄今为止最为准确的卫星遥感气溶胶设备之一. 与 MODIS 相比, MISR 在以下几个方面具有独特的优势. (1) 在研究区域气溶胶时空分布上, MISR 数据在地表反照率较高和缺少植被的地区反演结果更好; 因而更适合于干旱、半干旱和人口密度较高的城市中心地区, 而这些地区在沙尘暴来源和区域空气质量污染研究中是非常重要的. (2) 用 MISR 和 MODIS AOT 数据建立统计模型与地面  $PM_{2.5}$  浓度进行比对, 当在模型中加入气象参数、季节和地理参数作为变量时, MISR 和 MODIS AOT 均与观测值接近, MISR AOT 相关系数稍高. (3) 当采用比例计算方法对  $PM_{2.5}$  地面浓度进行预测时, MISR 和 MODIS 结果相当. (4) MISR 独具的立体观测功能可以对烟尘喷射高度进行反演, 在评估森林大火和沙尘暴对人群暴露率的影响研究中具有重要的应用价值; 同时可以提高化学传输模型所需的三维排放清单的准确度. (6) MISR 数据中所包含的  $PM_{2.5}$  化学成分信息可能通过 MISR 的气溶胶混合物数据提取得到; 进一步利用组分 AOT 法可以对有限的地面观测进行补充, 对  $PM_{2.5}$  中不同成分的时空分布特征进行描述.

MISR 数据的主要缺点在于访问周期长, 数据频度比较低. 由于 MISR 相机并不能在轨道上进行交叉往复式扫描, MISR 刈幅只能固定在 370 km 左右. 尽管 MISR 在中纬度地区的访问周期平均为一周左右, 但是 MODIS 由于其 2300 km 扫描宽度能够拍到的烟尘过程, 会有很大一部分无法被 MISR 探测到. 此外, 云层和复杂的地形条件都会导致反演失效, 这些因素会进一步降低数据频度, 导致很多污染事件、沙尘暴和森林大火等无法记录. 因此, MISR 数据并不适合作为常规的每日监测, 但是 MISR 积累了将近八年的高质量数据可以成为对于颗粒物污染的长期时空分布趋势研究的非常有效的工具. 当与地面  $PM_{2.5}$  监测手段进行适当的关联后, MISR 反演  $PM_{2.5}$  浓度将是对地面观测的有力拓展.

**致谢** 本研究中 Ralph Kahn 的工作得到 NASA Climate and Radiation Research and Analysis Program(负责人: H. Maring)和 EOS-MISR Instrument 的支持, 他的工作完成于 NASA 喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory). 感谢兰利中心和 MISR 小组提供对 MISR 图像的技术支持, 感谢 Clare Averill (Acro Service Corporation/Jet Propulsion Laboratory)所做的图像解释, 本文中修改和使用了她的部分文字. 感谢清华大学环境科学与工程系的王挺提供文献检索支持.

## 参考文献

- 1 Samet J M, Dominici F, Curriero F C, et al. Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987–1994. *N Engl J Med*, 2000, 343(24): 1742—1749[DOI]
- 2 Vedal S, Petkau J, White R, et al. Acute effects of ambient inhalable particles in asthmatic and nonasthmatic children. *Am J Respir Crit Care Med*, 1998, 157(4): 1034—1043
- 3 Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manage Assoc*, 2006, 56(6): 709—742
- 4 Smith K R, Jantunen M. Why particles? *Chemosphere*, 2002, 49(9): 867—871[DOI]
- 5 He K B, Yang F M, Ma Y L, et al. The characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China. *Atmos Environ*, 2001, 35(29): 4959—4970[DOI]
- 6 Ye B, Jia X, Yang H, et al. Concentration and chemical composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai for a 1-year period. *Atmos Environ*, 2003, 37(4): 499—510[DOI]
- 7 Kaufman Y J, Herring D, Ranson K, et al. Earth observing system AM 1 mission to Earth. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36(4): 1045—1055[DOI]
- 8 Remer L A, Kaufman Y J, Tanre D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J Atmos Sci*, 2005, 62(4): 947—973[DOI]
- 9 Diner D, Beckert J, Reilly T H, et al. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36(4): 1072—1087[DOI]
- 10 Martonchik J V, Diner D J, Kahn R A, et al. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36(4): 1212—1227[DOI]
- 11 Diner D J, Braswell B H, Davies R, et al. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sens Environ*, 2005, 97(4): 495—518[DOI]
- 12 冯晓明, 赵英时, 陈永康. MISR 宽波段反照率反演及其与大气关系研究. *国土资源遥感*, 2003, 58(4): 22—25
- 13 韩波, 康立山, 陈毓屏, 等. 基于遥感数据的空间目标融合预测模型. *计算机工程*, 2006, 32(14): 35—39
- 14 韩波, 康立山, 陈毓屏, 等. 基于 MISR 遥感数据的优化融合预测模型. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(7): 97—100
- 15 Kahn R, Banerjee P, McDonald D. Sensitivity of multiangle imaging to natural mixtures of aerosols over ocean. *J Geophys Res*, 2001, 106(D16): 18219—18238[DOI]
- 16 Kahn R, Banerjee P, McDonald D, et al. Sensitivity of multiangle imaging to aerosol optical depth and to pure-particle size distribution and composition over ocean. *J Geophys Res*, 1998, 103(D24): 32195—32213[DOI]
- 17 Kalashnikova O V, Kahn R. Ability of multiangle remote sensing observations to identify and distinguish mineral dust types: 2. sensitivity over dark water. *J Geophys Res*, 2006, 111(D11): D11207[DOI]
- 18 Kalashnikova O V, Kahn R, Sokolik I N, et al. Ability of multiangle remote sensing observations to identify and distinguish mineral dust types: optical models and retrievals of optically thick plumes. *J Geophys Res*, 2005, 110(D18): D18S14[DOI]
- 19 Holben B, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET: a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens Environ*, 1998, 66(1): 1—16[DOI]
- 20 Smirnov A. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sens Environ*, 2000, 73(3): 337—349[DOI]
- 21 Russell P B, Livingston J M, Redemann J, et al. Multi-grid-cell validation of satellite aerosol property retrievals in INTEX/ITCT/ICARTT 2004. *J Geophys Res*, 2007, 112(D12): D12S09[DOI]
- 22 Schmid B, Redemann J, Russell P, et al. Coordinated airborne, spaceborne, and ground-based measurements of massive thick aerosol layers during the dry season in southern Africa. *J Geophys Res*, 2003, 108(D13): D8496[DOI]

- 23 Liu Y, Sarnat J A, Coull B A, et al. Validation of multiangle imaging spectroradiometer (MISR) aerosol optical thickness measurements using aerosol robotic network (AERONET) observations over the contiguous United States. *J Geophys Res*, 2004, 109(D6): D06205[DOI]
- 24 Kahn R A, Gaitley B J, Martonchik J V, et al. Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) global aerosol optical depth validation based on 2 years of coincident Aerosol Robotic Network (AERONET) observations. *J Geophys Res*, 2005, 110(D10): D10S04[DOI]
- 25 Abdou W A, Diner D J, Martonchik J V, et al. Comparison of coincident Multiangle Imaging Spectroradiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol optical depths over land and ocean scenes containing Aerosol Robotic Network sites. *J Geophys Res*, 2005, 110(D10): D10S07[DOI]
- 26 Prasad A, Singh R. Comparison of MISR-MODIS aerosol optical depth over the Indo-Gangetic basin during the winter and summer seasons (2000—2005). *Remote Sens Environ*, 2007, 107(1-2): 109—119[DOI]
- 27 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征. *科学通报*, 2003, 48(19): 2094—2100
- 28 Martonchik J, Diner D, Kahn R, et al. Comparison of MISR and AERONET aerosol optical depths over desert sites. *Geophys Res Lett*, 2004, 31(16): L16102[DOI]
- 29 Christopher S A, Wang J. Intercomparison between multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) and sunphotometer aerosol optical thickness in dust source regions over China: implications for satellite aerosol retrievals and radiative forcing calculations. *Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol*, 2004, 56(5): 451—456[DOI]
- 30 Jiang X, Liu Y, Yu B, et al. Comparison of MISR aerosol optical thickness with AERONET measurements in Beijing metropolitan area. *Remote Sens Environ*, 2007, 107(1-2): 45—53[DOI]
- 31 Solomon F, Giorgi F, Liousse C. Aerosol modelling for regional climate studies: application to anthropogenic particles and evaluation over a European/African domain. *Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol*, 2006, 58(1): 51—72[DOI]
- 32 Liu L, Laci A A, Carlson B E, et al. Assessing Goddard Institute for Space Studies ModelE aerosol climatology using satellite and ground-based measurements: a comparison study. *J Geophys Res*, 2006, 111(D20): D20212[DOI]
- 33 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用 MODIS 遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 1—7
- 34 刘桂青, 毛节泰, 李成才. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究. *上海环境科学*, 2003, 22(增刊 2): 58—63
- 35 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 641—651
- 36 Martonchik J, Diner D J, Crean K A, et al. Regional aerosol retrieval results from MISR. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40(7): 1520—1531[DOI]
- 37 Kahn R A, Li W H, Moroney C, et al. Aerosol source plume physical characteristics from space-based multiangle imaging. *J Geophys Res*, 2007, 112(D11): D11205[DOI]
- 38 Frank T D, Di Girolamo L, Geegan S. The spatial and temporal variability of aerosol optical depths in the Mojave Desert of southern California. *Remote Sens Environ*, 2007, 107(1-2): 54—64[DOI]
- 39 Prasad A K, Singh R P, Kafatos M. Influence of coal based thermal power plants on aerosol optical properties in the Indo-Gangetic basin. *Geophys Res Lett*, 2006, 33(5): L05805[DOI]
- 40 Di Girolamo L, Bond T C, Bramer D, et al. Analysis of Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) aerosol optical depths over greater India during winter 2001—2004. *Geophys Res Lett*, 2004, 31(23): L23115[DOI]
- 41 Jordan C E, Dibb J E, Anderson B E, et al. Uptake of nitrate and sulfate on dust aerosols during TRACE-P. *J Geophys Res*, 2003, 108(D21): 1—10
- 42 夏丽华, 王德辉, 王芳. 基于 MODIS 数据的广州市光化学污染预警等级研究. *国土资源遥感*, 2006, 70(4): 73—76
- 43 王皓, 查勇. MODIS 气溶胶光学厚度对城市空气质量的指示. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(3): 21—24
- 44 韩晶晶, 王式功, 祈斌, 等. 气溶胶光学厚度的分布特征及其与沙尘天气的关系. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 362—369
- 45 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染. *大气科学*, 2003, 27(5): 869—882
- 46 孙娟, 束炯, 鲁小琴, 等. MODIS 遥感气溶胶光学厚度产品在地面能见距中的应用. *环境科学与管理*, 2006, 31(5): 97—101
- 47 Chow J, Watson J, Lowenthal D, et al. Comparability between PM<sub>2.5</sub> and particle light scattering measurements. *Environ Monit Assess*, 2002, 79(1): 29—45[DOI]

- 48 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度. 大气科学, 2005, 29(3): 335—342
- 49 Liu Y, Sarnat J A, Kilaru A, et al. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> in the eastern united states using satellite remote sensing. Environ Sci Technol, 2005, 39(9): 3269—3278[DOI]
- 50 Liu Y, Franklin M, Kahn R, et al. Using Aerosol Optical Thickness to Predict Ground-Level PM<sub>2.5</sub> Concentrations in the St. Louis Area: a Comparison Between MISR and MODIS. Remote Sens Environ, 2007, 107(1-2): 33—44[DOI]
- 51 Vermote E F, Roger J C, Sinyuk A, et al. Fusion of MODIS-MISR aerosol inversion for estimation of aerosol absorption. Remote Sens Environ, 2007, 107(1-2): 81—89[DOI]
- 52 Liu Y, Park R J, Jacob D J, et al. Mapping annual mean ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations using Multiangle Imaging Spectroradiometer aerosol optical thickness over the contiguous United States. J Geophys Res, 2004, 109(D22): D22206[DOI]
- 53 Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, et al. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: model description and evaluation. J Geophys Res, 2001, 106(D19): 23073—23095[DOI]
- 54 Park R J, Jacob D J, Field B D, et al. Natural and transboundary pollution influences on sulfate-nitrate-ammonium aerosols in the United States: implications for policy. J Geophys Res, 2004, 109(D15): D15204[DOI]
- 55 Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. J Geophys Res, 2001, 106(D17): 20255—20273[DOI]
- 56 Van Donkelaar A, Martin R V, Park R J. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. J Geophys Res, 2006, 111(D21): D21201[DOI]
- 57 Muller J P, Mandanayake A, Moroney C, et al. MISR stereoscopic image matchers: techniques and results. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2002, 40(7): 1547—1559[DOI]
- 58 Stenchikov G, Lahoti N, Diner D J, et al. Multiscale plume transport from the collapse of the World Trade Center on September 11, 2001. Environ Fluid Mech, 2006, 6(5): 425—450[DOI]
- 59 Mazzoni D, Logan J, Diner D, et al. A data-mining approach to associating MISR smoke plume heights with MODIS fire measurements. Remote Sens Environ, 2007, 107(1-2): 138—148[DOI]
- 60 Liu Y, Kahn R, Koutrakis P. Estimating PM<sub>2.5</sub> Component concentrations and size distributions using satellite retrieved fractional aerosol optical depth: part I ——method development. J Air Waste Manage Assoc, 2007, 57(11): 1351—1359
- 61 Liu Y, Kahn R, Turquety S, et al. Estimating PM<sub>2.5</sub> component concentrations and size distributions using satellite retrieved fractional aerosol optical depth: part II ——a case study. J Air Waste Manage Assoc, 2007, 57(11): 1360—1369